DOI:10.19789/j.1004-9398.2016.04.006

亚波长金属缝中的拍

宋立鹏 高 琪
(首都师范大学物理系,北京 100048)

摘 要

用时域有限差分法研究两列频率相近的光入射到金属亚波长狭缝中的情况,发现理想金属狭缝中磁场会形成拍,这与真空中情况一致. 但是实际金属(银)狭缝中的磁场与真空情况有较大不同,主要是振幅大为降低,超过了对实际金属吸收的预期. 这是因为亚波长狭缝中表面等离子体波在靠近金属壁处形成很强的电场,能量更多的以电场形式表现,磁场被削弱.

关键词: 亚波长金属狭缝,拍,坡印廷矢量,不同频率.
中图分类号: O43

0 引 言

亚波长光学是以表面等离子体激元(SPPs)为核心研究内容的新兴学科. 这一学科研究亚波长尺寸下光学器件和光学系统中光的行为和性质,利用表面等离子体和光子的相互作用,在亚波长的范围内实现对光的控制和利用. 在众多的亚波长光学器件中,金属狭缝(MDM)波导结构吸引了很多的注意力,在这种波导结构中SPPs局域在狭缝内,研究起来更简单,而且这种结构容易制备. 真空中当频率相近的两束单色光波在真空中从同一位置入射,它们会产生拍. 在研究亚波长金属波导时文献的研究总是以单色波入射而且在金属狭缝中的场强、透射率、波长也做过详细的理论分析证明[1-4]. 当频率相近的两束单色波同时同位置入射亚波长理想金属狭缝中时,在金属狭缝中是否还会形成拍,形成的拍是否会有不同? 本文针对这些问题分别对理想金属狭缝与实际金属(银)狭缝进行具体模拟分析研究. 本文还对在真空中与在理想金属狭缝中、实际金属(银)狭缝中坡印廷矢量大小随空间位置的变化进行模拟分析研究.

收稿日期: 2015-06-25

1 模拟与分析

真空中沿相同方向传播的两列频率相近振幅相同的平面单色波可以叠加形成拍[5]. 在笛卡尔坐标系中,若令传播方向沿z轴正向,则总磁场强度可表示为:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{H} &= \boldsymbol{H}_1 + \boldsymbol{H}_2\\ &= H_0 e^{i(k_1 z-\omega_1 t)} + H_0 e^{i(k_2 z-\omega_2 t)}\\ &= H_0 2\cos\left(\frac{k_1-k_2}{2}z-\frac{\omega_1-\omega_2}{2}t\right)e^{i\left(\frac{k_1+k_2}{2}z-\frac{\omega_1+\omega_2}{2}t\right)}\\ &= H_0 2\cos\left[2\pi(z-ct)/\frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2-\lambda_1}\right]e^{i\left(2\pi(z-ct)/\frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1+\lambda_2}\right)}\end{aligned} \quad (1)$$

其中c为真空中光速,ω_1、ω_2、λ_1、λ_2分别为两列波的圆频率与其在真空中的波长,$k_1=2\pi/\lambda_1$、$k_2=2\pi/\lambda_2$分别为两列波的波矢. 由式(1)易知,$\lambda_1\lambda_2/(\lambda_2-\lambda_1)$为拍振幅缓慢变化包络面的波长,包络面时间周期为:$cT=\lambda_1\lambda_2/(\lambda_2-\lambda_1)$,本文取两列波波长分别为0.91 μm与0.93 μm,可以计算出时间周期cT约为42 μm. 空间位置的周期为$Z=2\pi/(K_1-K_2)$在真空中周期约为$Z=42$ μm. 通过理论计算可以得出在真空中磁场随时间的变化如图1(a),随空间位置的变化如图1(b). 图1(a)、图1(b)可以看出在真空中传播的这两束波传播,无论磁场随着时间变化还是随着空间的变化都能形成拍. 由图1由箭头标示处的数值可以看出时间周期

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

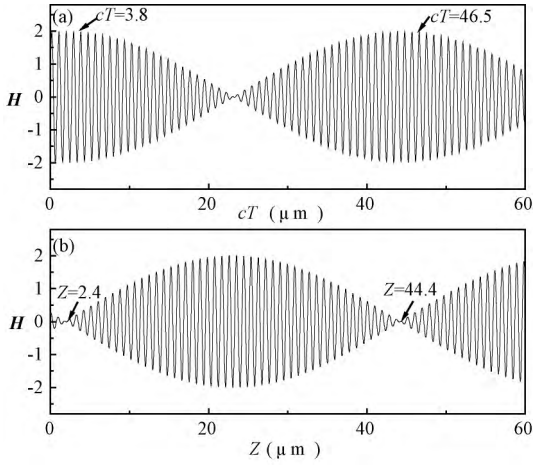


图 1 (a) 真空中两列光波入射磁场随着时间位置的变化;(b) 真空中两列光波入射磁场随着空间位置的变化

cT 约是 42 μm,空间周期也约为 42 μm.

在真空中两列光会形成拍的现象,那么在金属狭缝中会不会形成拍的现象?由于在金属狭缝中会发生 SPP,光的传播通过理论计算一般比较复杂,本文利用时域有限差分(FDTD)算法进行模拟研究.在此首先建立如图 2 所示的结构装置图,金属膜厚度 $h=100$ μm,金属缝宽 $w=0.1$ μm,除金属之外的介质均为空气.

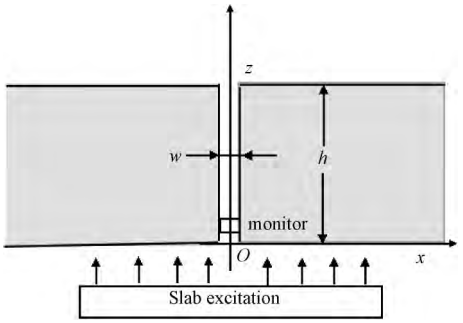


图 2 结构装置图,缝宽为 $w=0.1$ μm,厚度 $h=100$ μm,建立坐标系原点 O 在图中所示位置,x 轴为金属下表面,z 轴为狭缝中心轴线

本文在模拟计算时,将磁场沿 y 方向偏振的光源(TM 波)波长为 0.91 μm 与 0.93 μm 同时从 $Z=-1$ μm 沿 z 方向同时入射,首先模拟研究理想金属狭缝中会不会形成拍,探测器模拟出狭缝中的某一位置磁场随着时间的变化图 3(a) 与金属狭缝中心轴线上磁场的空间分布变化如图 3(b).

图 3(a),3(b) 可以看出在理想金属狭缝中磁场无论是随着时间的变化还是随着空间的变化,都能形成拍.但是由于散射区域[6,7]与金属损耗的存在使得在理想金属狭缝中磁场的振幅减小.在理想

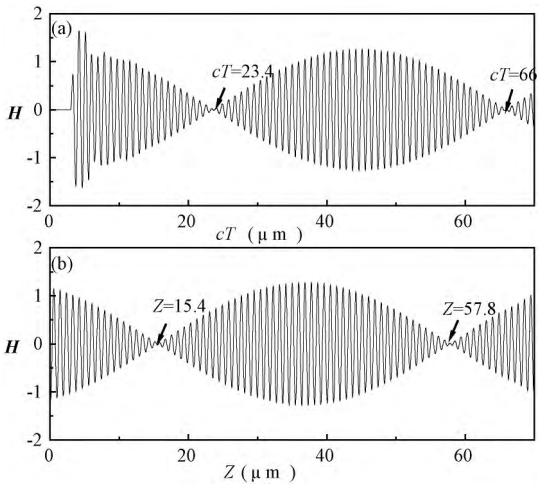


图 3 (a) 双光波入射时理想金属狭缝中某一点磁场随着时间的变化;(b) 双光波入射时理想金属狭缝中中心轴线上磁场随空间的变化

金属狭缝中可以形成拍,由箭头标示处所示可以看出包络面的时间周期 cT 也是约为 42 μm,空间周期也是约为 42 μm,可以看出在理想金属狭缝中周期没有发生变化.接下来模拟研究在实际金属(银)的狭缝中是否也会形成拍?按照模拟装置图 2 模拟研究实际金属(银)狭缝磁场随时间的变化如图 4(a) 与磁场随空间的变化如图 4(b).

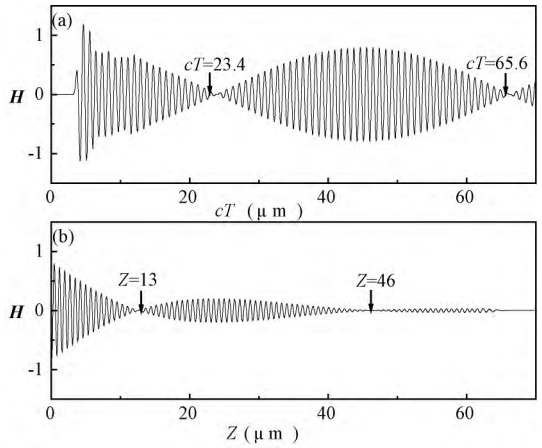


图 4 (a) 双光波入射时实际金属(银)狭缝中某一点磁场随着时间的变化;(b) 双光波入射时实际金属(银)狭缝中中心轴线上磁场随空间的变化

图 4 可以得出,在实际金属(银)狭缝中磁场随时间与空间的变化形成拍,包络面的时间周期由箭头标示处可以看出约为 42 μm,但是空间周期变成 33 μm,可以得出空间的周期发生变化,由文献[8]知在实际金属(银)狭缝中波长会发生变化,从而导致空间周期的变化.但是实际金属(银)狭缝中的磁场与真空情况有较大不同,对比与真空中的振幅大为

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

降低,超过了对实际金属吸收的预期. 由图 4(b) 可以看出光波随空间位置的变长的振幅越来越弱,形成的拍的振幅也很小. 图 3 与图 4 可以看出在理想金属中磁场的振幅明显大于在金属银狭缝中的磁场振幅,那么总的能流会不会有明显的差异,对此本文进行模拟研究,模拟出在同一狭缝位置处,能流随着时间的变化. 如图 5,细实线为在银的金属狭缝中一位置处能流随时间的变化,粗实线为理想金属狭缝中在同一位置处能流随时间的变化. 对比可以得出在同一位置处能流随时间的变化差异并不是很大,这说明虽然在实际金属(银) 的狭缝中,虽然磁场振幅要明显小于在理想金属狭缝中磁场振幅,但是亚波长狭缝中磁场只有 H_y 分量,电场有 E_x 与 E_z 分量. 由狭缝内电磁场的关系可以得知在狭缝内 E_x 与 H_y 相差不大,而在随着靠近金属表面时电场的 E_z 分量会越来越强,因此表面等离子体波在靠近金属壁处形成很强的电场,能量更多的以电场形式表现,磁场被削弱. 从而使得在实际金属(银) 狭缝中的能流变化与理想金属狭缝中差异不大.

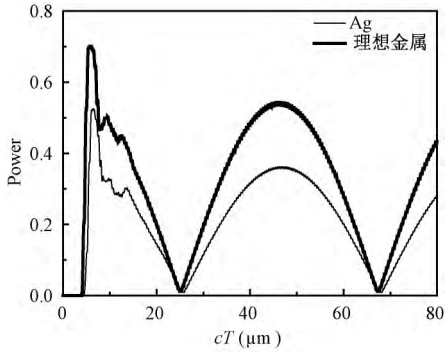


图 5　粗实线为在理想金属狭缝中一位置处能流随时间的变化,细实线为实际金属(银) 狭缝中能流随时间的变化

通过以上的模拟研究可以得出在真空中与在金属狭缝中都能形成拍,在此本文进一步模拟研究在真空中与金属狭缝中的坡印廷矢量大小的变化. 按照模拟装置图 2 分别模拟出坡印廷矢量大小在真空中随空间的变化如图 6(a) 、在理想金属狭缝中心轴线上坡印廷矢量随着空间位置的变化如图 6(b) 、在实际金属(银) 狭缝中心轴线上坡印廷矢量随着空间位置的变化如图 6(c) .

从图 6 可以得出在真空中的坡印廷矢量与在理想金属在的坡印廷矢量变化都是一种振荡的变化,不同在于坡印廷矢量的大小变化极值,由磁场随空间的变化得知由于金属存在散射区域与金属损耗的影响,磁场的振幅会变小从而导致坡印廷矢量大小在理想金属狭缝中的极值会变小. 在实际金属(银) 狭缝中可以看出随着空间位置的变化坡印廷矢量大小是趋于一个很小数值的变化,这与随着光波的行进在金属银狭缝中损耗越来越多相关. 但是在小数值的情况下也可以得出坡印廷矢量也是一种振荡的变化. 可以得出在真空中与在金属狭缝中坡印廷矢量随着空间位置的变化都是一种振荡的变化.

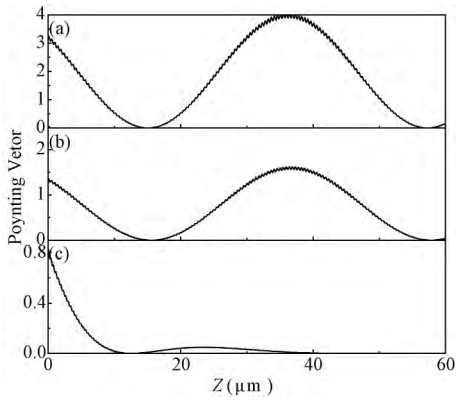


图 6　(a) 在真空中双光波坡印廷矢量大小随着空间位置的变化; (b) 双光波入射时在理想金属狭缝中线轴线上坡印廷矢量随着空间位置的变化; (c) 双光波入射时在实际金属(银) 狭缝中线轴线上坡印廷矢量随着空间位置的变化

2　结　论

通过本文的模拟分析研究可以得出在理想金属狭缝与实际金属(银) 狭缝中,两列频率相近光波同时入射,狭缝中的磁场无论是随着时间与空间的变化都能形成拍的形式. 在理想金属狭缝中拍的时间周期与空间周期与真空中的周期相同,在实际金属(银) 狭缝中时间周期与真空中一样,空间周期发生变化. 在狭缝中形成拍与真空中拍不同的是的振幅也发生变化. 这主要是由于金属的损耗与散射区域引起的. 虽然在实际金属(银) 狭缝中的磁场振幅明显小于在理想金属狭缝中的磁场振幅. 但是狭缝中的能流随着时间变化差异不大,说明在实际金属(银) 中能量更多的以电场形式表现. 最后对坡印廷矢量的模拟分析研究可以得出在真空中与在金属狭缝中坡印廷矢量大小随着空间位置都是一种振荡的变化,不同的也是坡印廷矢量大小的极值不同.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参 考 文 献

[1] Barnes W L,Dereux A,Ebbesen T W. Suface plasmon subwavelength optics [J]. Nature, 2003,424: 824 – 830.

[2] Ebbesen T W,Lezec H J,Ghaemi H F,et al. Extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays [J]. Nature,1998,391: 667 – 669.

[3] Porto J A,Garcia-Vidal F J,Pendry J B. Transmission resonances on metallic gratings with very narrow slits [J]. Phys Rev Lett,1999,83: 2845 – 2848.

[4] Li C,Zhou Y S,Wang H Y,et al. Wavelength squeeze of surface plasmon polariton in a subwavelength metal slit [J]. J Opt Soc Am B,2010,27(1): 59 – 64.

[5] 张晋鲁,陈发堂. 光学拍现象的研究 [J]. 陕西师大学报,1992,20(1): 81 – 82.

[6] Zhou Y S, Gu B Y, Wang H Y, et al. Multi-reflection process of extraordinary optical transmission in a single subwavelength mental slit [J]. EPL,2009,85: 24005.

[7] Zhou Y S,Gu B Y,Wang H Y,et al. Numerical confirmation of multi-reflections of light inside a subwavelength metal slit structure [J]. Chin Phys Lett,2010, 27(3): 282 – 285.

The Beat in a Subwavelength Metal Slit

Song Lipeng Gao Qi

(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048)

Abstract

The electromagnetic wave in metal subwavelength slit excited by two incident waves with the similar frequencies was investigated by using of the finite difference time domain (FDTD) method. Our results show that, in the perfect metal slit, the magnetic field represents the "beat" characteristics, just as the superposed field of the two corresponding waves in vacuum. In the silver slit, the magnetic field is quite different from that in the perfect slit. This is because the surface plasmon polariton wave in real metal slit has been excited with the very strong electric field, which taken the majority energy and depressed the corresponding magnetic field.

Key words: subwavelength mental slit, beat, Poynting vector, different frequency.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net